



量子场论的开创者 狄拉克

——为庆贺狄拉克八十寿辰而作——

狄拉克 (Paul Adrien Maurice Dirac) 是廿世纪量子理论力学的开创者之一。他在科学上对人类作出的贡献,同牛顿和爱因斯坦一样,将会是不朽的,狄拉克不仅参与了量子力学的建立,而且是量子电动力学和量子场论的开创者,从而也是当代高能物理的最重要的理论先驱之一。此外,他所引入的真空图象和得到实验证实的关于反物质的预言,深刻地改变了人类对于自然的认识,

一、学习阶段

狄拉克 1902 年 8 月 8 日生于英国布列斯托尔城。父亲是个法语教师,家教很严。狄拉克从小喜爱数学和自然科学,中学时自学了许多数学书。十六岁时,他跳级读完中学后到布列斯托尔大学学电工。工科教育使他养成了重视物理世界的求实精神。由于英国战后的经济萧条,狄拉克大学毕业后找不到工作。后来有机会在母校进修了两年数学,这为他日后迅速进入科研前沿打下了扎实的数学基础。

狄拉克大学时代对相对论非常感兴趣。1923 年到剑桥圣约翰学院当研究生,狄拉克一心想跟相对论专家坎宁安 (Cunningham) 研究狭义相对论。可惜事与愿违,坎宁安不收研究生,狄拉克被交给了量子论专家福勒。这使他甚为失望。但不久,狄拉克发现这种失望毫无道理,因为福勒向他展示了一个十分有趣的原子领域。福勒当时负责卡文迪什实验室理论方面的工作,且与玻尔、卢瑟福过从甚密。因此,在他的指导下,学生对理论物理和实验物理方面的最新动态都能及时了解。此外,剑桥大学还有许多科学讨论会,如“ ∇^2 俱乐部”、“卡皮查俱乐部”等。人们在那里可以自由地讨论各种学术问题,在这种活跃的学术气氛中,狄拉克从第一次听说玻尔原子理论到在这一领域做出第一流的贡献,总共只化了两年时间。

狄拉克在剑桥当研究生时的生活简单而有规律。除每星期听四、五次讲演之外,其它时间基本上是在图书馆度过的。他很少交际,几乎不看什么文艺作品,他喜欢独自工作和沉思默想。散步大概是他唯一的消遣。他总是紧张地工作一星期,然后在星期天带着午

饭,到乡下走上一天,放松一下。他的量子泊松括号思想就是在这样的散步中产生的。

二、参与建立量子力学

1925 年 9 月,福勒给正在布列斯托尔度假的狄拉克寄了一份材料——海森伯论矩阵力学的第一篇论文的预印本——并要他谈谈自己的看法。狄拉克一开始并不重视,因为他觉得这与作为原子物理学基础的经典哈密顿理论有点不一致。但在十几天后重读这篇论文时,狄拉克开始意识到海森伯新理论中包含着打开原子世界秘密的钥匙。他认识到,量子化的物理量的乘法的不可对易性显示了量子理论与经典理论间最本质的差别。因此,重要的任务就是由此设法找出量子理论与经典理论之间的本质联系,并把海森伯理论纳入哈密顿公式体系。

有一个星期天,狄拉克在郊外散步时突然想到量子理论的对易子与理论力学中的泊松括号似乎有着某种想象之处,而在这种相象中又可能有某种重要的东西。他赶紧回家找书查阅,但家里没有必要的书籍,只得耐着性子等了一夜。第二天一清早,他赶到图书馆,在惠特克的《分析动力学》中找到了泊松括号的定义。他发现,只要在泊松括号前乘上系数 $i\hbar$,就可以认为它是量子对易子的类比物。由此出发,狄拉克建立了正则量子化方案。它与玻尔量子化条件不同,是在量子理论本身的基础上合乎逻辑地推导出来的。就这样,23 岁的狄拉克以一种新颖的见解克服了建立新力学中的巨大困难,走到了玻恩、海森伯和约当的前面。

从研究泊松括号问题开始,狄拉克一直对理论研究中的记号问题十分重视。他觉得,记号的好坏对研究工作有很大的影响。他认为记号中应当包含那些重要的必须明确述及的因子,而对肯定不会弄错的东西则不必明显地写在记号中。狄拉克发明的不少记号,如左矢、右矢、量子泊松括号等,简洁明了,给研究工作带来许多方便,早已为广大理论物理工作者所接受,成为物理学家的共同财富。

此后不久,狄拉克提出了一种比矩阵力学更抽象更普遍的 q 数理论。 q 数代表各种不可对易的物理

量,它们都可以用矩阵来表示。这种表示并不是唯一的,不同的表示之间有一定的转换关系。狄拉克利用 q 数理论去处理氢原子光谱的问题,成功地推出了巴尔末公式。这使海森伯在给狄拉克的信中感慨道:“我在物理学世界中落后了。”

狄拉克在1926年夏天完成论述康普顿效应的博士论文并获得博士学位以后,在薛定谔多体波函数的启示下又开始研究全同粒子系统。他发现,如果描述全同粒子的多体波函数是对称的,那末这些粒子就服从玻色-爱因斯坦统计;如果波函数是反对称的,那末这些粒子就服从另一种统计,后来命名的费米-狄拉克统计。虽然费米在几个月前已经提出了这后一种统计法,但狄拉克却更深刻地证明了统计类型与波函数对称性质间的内在联系:在波函数为反对称的情况下,新的统计是量子力学的必然结果。

1926年9月,年轻的狄拉克博士到哥本哈根和哥丁根访问。他在哥本哈根受到亲切友好的接待,结识了玻尔、埃伦费斯特、泡利等人,并在那里参加各种学术讨论。在眼界大为开阔的同时,狄拉克的研究工作也达到了一个新的境界。当时的量子理论有海森伯的矩阵力学和薛定谔的波动力学两种形式。玻恩的几率解释把这两种形式统一了起来。但如何用严整的逻辑结构把这个统一性表示出来并加以推广,则仍然是量子理论发展中的一个重要问题。在约当、朗佐斯(Lanczos)等人工作的基础上,狄拉克引进了 δ 函数,建立了量子力学的普遍变换理论出色地解决了这一问题。通过变换理论,可以从矩阵力学推出薛定谔方程,并可以证明薛定谔波动方程的本征函数正好就是从坐标表象和能量表象之间的变换函数。变换理论的出现标志着非相对论性量子力学逻辑结构的完成,并在物理思想和数学论证手段上为测不准原理的提出准备了条件。

三、狄拉克方程

1928年初,玻恩收到一位年轻人的信,在信的最后,年轻人谈到自己新近得到的相对论性电子方程。那时,玻恩的两个学生约当和魏格纳(Wigner)正在研究这个问题,但没有成功。首先读到这封信的约当感慨地说,“我多么希望我们自己发现这个方程啊!它是那么美,我真为这个发现高兴。”这个年轻人就是狄拉克,而这个方程,就是著名的狄拉克方程。

狄拉克到剑桥后虽然未能实现研究相对论的愿望,但他对相对论的兴趣却经久不衰。他一直企图把所有的物理理论都改造成满足相对论要求的物理理论,尽管当时相对论性的克莱因-高登方程得到了大多数人,包括玻尔的赞赏,但狄拉克仍然感到不能满意。因为他认为这里缺少一种逻辑一贯性。在狄拉克看来,一种令人满意的相对论性电子理论应是一种对时

间坐标和空间坐标来说都是线性的微分方程,以免出现与几率解释不能相容的负几率。在泡利矩阵的启发下,狄拉克把二行二列的泡利矩阵推广到四行四列矩阵,成功地建立了相对论性电子波动方程。

狄拉克方程的解自动地给出了实验所要求的 $\hbar/2$ 自旋值和 $e\hbar/2mc$ 磁矩值,又给出了索末菲的精细结构公式。这是理论成功地解释实验事实的范例。以这一方程为核心内容的相对论性电子理论,为二十年量子物理学中原先是各自独立的主要实验事实,包括电子的康普顿散射、塞曼效应和电子自旋等提供了一种统一的说明。

四、真空图象

尽管狄拉克方程取得了巨大的成功,但它却有一个严重的缺点,即它具有负能解。并且,这种负能解是狄拉克的四分量矩阵方程所固有的。

狄拉克认为,应该敢于坚持理论的逻辑结论,并根据已有的科学成果为其寻找合理的解释,不能因其奇特怪诞而轻易放弃。他于1929年12月提出了一个解决方案。在这一方案中,认可了负能态的存在,并认为真空并非空无所有,而是所有的负能态都已填满而所有的正能态都未被占据的最低能态。这种真空作为一种普遍存在的背景,并没有可观察的效应。因为,根据泡利不相容原理,电子不可能发生由正能态向已填满的负能态的跃迁。未被填满的负能态的空穴将表现为带正电荷的正能粒子。带负电的正能粒子与带正电的正能粒子相遇而湮没,则可解释为带负电的正能粒子由正能态跃迁入负能态的空穴。一开始,狄拉克把与空穴相对应的正电粒子看作是质子,把电子和质子间的巨大质量差归因于额外的库仑作用。这受到韦尔(Weyl)和奥本海默(Oppenheimer)的批评。1931年5月,狄拉克接受了他们的意见,从数学对称性出发,把带正电的空穴看作是一种实验物理还不知道的新粒子,它们与电子的质量相同电荷相反。狄拉克称它们为反粒子或反物质。反物质概念的提出,极大地加深了人们对自然界的认识。根据这一概念,狄拉克预言了正反粒子对的产生和湮没,并为物质存在的实物形式和辐射形式的相互转换提供了一种具体机制。狄拉克还进一步在正反粒子之间引进了一种崭新的电荷共轭对称性,反粒子概念和电荷共轭对称性概念在当代高能物理理论中都是很重要的基本概念。

1930年,中国物理学家赵忠尧在研究硬 γ 射线的散射时曾经发现过一个可以解释为出现了阳电子(反电子)的反常峰值,遗憾的是,由于当时理论准备不足,这一现象没有引起足够的重视。1932年8月安德森宣布在宇宙线实验中发现了阳电子(反电子)。一年以后布拉凯特和奥基亚利尼在实验室中证实了正反电子对的产生和湮没。由于狄拉克方程不仅可以描述电子,

也可以描述质子、中子和超子等自旋为 $\hbar/2$ 的费米子。因此，它也就同样地预言了这些费米子的反粒子的存在。1955 年在实验中发现了反质子，1956 年发现反中子，1959 年我国物理学家王淦昌和丁大钊、王祝翔等发现了反西格玛负超子。接着，其它反粒子也相继发现了。这些发现有力地证明了狄拉克理论的强大的科学预见能力。

五、量子场论的开创者

1927 年 2 月到 4 月，狄拉克在研究辐射与色散的量子理论时，把电磁场的波函数看作 q 数并把它纳入正则量子化方案。从而就把电磁场也量子化了。他把这称为二次量子化。通过二次量子化，狄拉克把光子的哈密顿量与电磁场的哈密顿量等同起来，算出了爱因斯坦 A 系数以及 A 系数与 B 系数之间的爱因斯坦关系。这样，狄拉克就建立了一种完备的量子辐射理论，把整个爱因斯坦辐射理论推导出来了。此外，狄拉克还利用含时微扰论推导出了克拉默斯与海森堡公式。这些工作被认为是量子电动力学的基础和量子场论的萌芽。

当然，完整的量子电动力学只有在维格纳和约当建立了费米子场的量子化方案后才有可能建立，而电子-阳电子场概念的提出，又只有在空穴理论的基础上把狄拉克方程看作场方程以后才有可能。但是，狄拉克在建立量子电动力学和量子场论中的开创作用却是举世公认的。

1932 年，狄拉克提出一种多时理论，对每一个粒子都规定了一个它自己固有的时标。这种理论的优点是它具有明显的相对论不变性，这对于后来朝永、施温格和费曼发展相对论协变的量子场论有着重要的意义。在多时理论中，狄拉克还引用了他在 1926 年讨论量子力学时就已提出来的相互作用表象。这种表象在场论的微扰论方法中发挥了重大作用，很有实用价值。

狄拉克在量子场论方面还做了许多工作。例如，1933 年，他最先提出了电荷重正化。1934 年，他又提出了场算子乘积的真空期待值问题。为此，他第一次用 Bessel 函数写出了在场论的传播子理论和对易子理论中极为重要的不变 D 函数的显示表式，没有这些表式，近代高能理论物理要得到发展是难以想象的。

狄拉克具有着在科学上不懈地追求的精神。他对电和磁的完全对称性的追求，导致了磁单极理论(1931 年)；他出于对宇宙万物间内在的必然的联系信仰与追求又使他提出了大数假说。虽然对于磁单极理论和的大数假说这样的工作现在还很难作出确切的评价，但这些工作至少说明他在理论上的探索的深度。另一个更能说明狄拉克在科学上的追求精神的例子是，在广义相对论研究处于低潮时期的 1958 年狄拉克提出了目前引起广泛兴趣的引力场量子化理论。

六、献身于科学的人

狄拉克的青年时代正好是原子物理学实验积累了大量材料，量子理论经历了急剧变革的时代，他曾把这个时代称为理论物理学的黄金时代。确实，那也是他的黄金时代。他在量子力学理论基础、特别是普遍变换理论的建立方面，在相对论性电子理论的创立方面以及在量子电动力学和量子场论的建立方面都作出了重大贡献，有力地推动了量子物理学的发展。由于这些不朽的贡献，狄拉克享有崇高的声誉。他于 1927 年当选为剑桥圣约翰学院学术委员，1930 年当选为英国皇家学会委员，1932 年当选为剑桥大学鲁卡斯讲座数学教授。1933 年 12 月，狄拉克与薛定谔共获 1933 年度物理学诺贝尔奖金，以后他还得到一系列奖章和荣誉职称，被公认为当代第一流的科学家。

然而，正如他的助手所说的那样，“你会见过许多伟大的科学家，而狄拉克很可能是所有这些科学家中最谦虚的。”大家公认，狄拉克预言阳电子以及后来的实验证实是理论物理学的一个最突出的成就。但狄拉克却认为这只不过是爱因斯坦狭义相对论的直接结果。他不喜欢谈自己的成就，却经常强调别人工作的重要性，再三指出自己从同时代人那里得到什么教益，自己在哪些地方不如别人哪些地方出现过错。当费米向他指出他发表的结果与费米的工作有所重复时，尽管他的工作比费米有所发展，他却并没有为自己辩解，争夺优先权，而是立刻向费米道歉，请求费米的谅解，表现了高尚的科学道德。

狄拉克对物理学的发展充满信心，把自己毕生的精力、兴趣、热情全部投入追求科学真理的事业。不管他提出的理论是成功还是失败，被接受还是被否定，他都以一种无私的献身精神工作着。不管是世界大战还是国内经济萧条，都不能使他中断自己的工作。1969 年狄拉克按英国惯例退休后，又到美国迈阿密大学和佛罗里达州立大学继续任教，继续从事教学和研究工作。

狄拉克热爱科学、追求真理，从不随波逐流。他不大关心政治，但富于正义感；一心治学、学风谨严。他为人谦虚，性格内向，他一生大部分时间非常拘谨，很少与人交往，极少与别人一起发表文章，也几乎不与学生一起工作。但他对人非常真诚友好，赢得了所有熟悉他的人的爱戴。他好凝神沉思，总想以最适当的方式来画出一幅简化和易领悟的自然图象，但又思想活跃，视野宽阔，有深刻的洞察力，往往能见人所未见，走在时代前面探索一些有重大理论意义的问题。狄拉克反对宗教迷信、崇尚理性，坚持社会正义，他算得上是一个高尚正直的、真正献身于科学的人。

(曹南燕)